

Артем'єв С. Р.,  
Андронов В. А.,  
Семків О. М.

## ПРО МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ

*У матеріалі статті у рамках продовження проведення літературного огляду розглянуто деякі механічні властивості ниткоподібних кристалів, на підставі проведених експериментальних наукових досліджень показано вплив зміни їх характеристик на структуру кристалів та неоднозначність оцінки прямого взаємозв'язку між міцністю кристалу та його будовою.*

**Ключові слова:** ниткоподібні кристали, механічні властивості, структура, міцність, взаємозв'язок.

### 1. Вступ

Вважається [1], що структура ниткоподібних кристалів (вусів) достатньо досконала, а межа їх міцності наближається до теоретичної. Однак раніше проведені дослідження засвідчили неоднозначність зв'язку між досконалою будовою «вусів» і їх високою міцністю. Проведений літературний огляд за питанням дослідження такої групи властивостей ниткоподібних кристалів як механічні властивості, показав наявність дефектів кристалічної структури у «вусах», а також залежність міцності кристалів від поперечного і поздовжнього розмірів «вусів».

Надвисока міцність «вусів», про яку вказує практична більша кількість літературних джерел, напругу пов'язана з впливом поверхні, яка має будову і типом міжатомного зв'язку [1].

Міцність «вусів» при цьому може змінюватись у широкому діапазоні і залежить від структури поверхневих шарів та співвідношення об'ємів поверхневих шарів у порівнянні з загальним об'ємом «вусів».

### 2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Особливості структури тонких плівок, покриттів і поверхневих шарів твердих тіл обумовлюють відмінність їх властивостей від властивостей речовин монолітної будови [1]. Особливо це стосується таких механічних властивостей, як міцність і пластичність, для яких дефектність будови є одним із основних визначальних чинників. Відомо [1], що найкращим матеріалом для вивчення міцності та пластичності плівок і покриттів є модельні матеріали з бездефектною кристалічною решіткою, якими є ниткоподібні кристали малих розмірів.

Дослідження механічних властивостей ниткоподібних кристалів розглянуто вже у достатній кількості літературних джерел, зокрема в [1–12], але оцінка результатів експериментальних досліджень є при цьому достатньо різною та нерівнозначною. В статті на підставі проведеного літературного огляду розглянуто та надано оцінку деяким механічним властивостям ниткоподібних кристалів, проаналізовано вплив зміни їх характеристик на структуру кристалів та неоднозначність оцінки прямого взаємозв'язку між міцністю кристалу та його будовою.

### 3. Цілі та завдання дослідження

Метою викладення матеріалу у даній статті є проведення у рамках літературного огляду аналізу та оцінки впливу деяких механічних властивостей ниткоподібних кристалів на структуру кристалів з урахуванням зміни характеристик даної групи властивостей.

### 4. Літературний огляд за проблемою дослідження

Ниткоподібні кристали — «вуса», які були одержані ще у 50-60-х роках, це невеликі кристали з середнім розміром 1–20 мкм, які отримують у спеціальних умовах, у більшості випадків, повільною кристалізацією з розплаву, розчину або осадом з газової фази. Вважається [2], що структура їх дуже досконала, а межа міцності наближається до теоретичної та досягає значень  $10^9$ – $10^{10}$  Па.

Так, Бережковою Г. В. у [2] було виявлено, що практично у всіх випадках ниткоподібні кристали з одною, або двома осовими дислокаціями витримують деформацію від 0,2 до 10 %. Крім того, нею було встановлено масштабний ефект залежності міцності від поперечного і поздовжнього розмірів «вусів». Виявилось, що висока міцність, яка є близькою до теоретичної, характерна для «вусів» дуже малої товщини (менше 5 мкм). Зі збільшенням товщини «вусів» їх міцність падає і для товстих «вусів» (розміром більше 50 мкм) та стає співрозмірною з міцністю звичайних матеріалів [2].

Наприклад, ниткоподібні кристали оксиду алюмінію мають межу міцності  $2,8 \times 10^{10}$  Па, заліза —  $1,38 \times 10^{10}$  Па, кобальту —  $0,6 \times 10^{10}$  Па, міді —  $0,45 \times 10^{10}$  Па, нікелю —  $0,3 \times 10^{10}$  Па [2].

Але проведені у подальшому експериментальні дослідження ниткоподібних кристалів засвідчили неоднозначність зв'язку між їх досконалою будовою і високою міцністю. Їх результати свідчать, що у ниткоподібних кристалах можуть бути присутні дислокації у великій кількості, особливо у «товстих» зразках [3].

Надвисоку міцність «вусів» можна пояснити впливом поверхні, що обумовлено специфікою її будови [4]. Бар'єрний ефект атомарно чистої поверхні може мати суттєве значення під час деформації кристалів з малим поперечним перерізом і розвинutoю поверхнею типу ниткоподібних кристалів і тонких плівок, де питомий об'єм приповерхневих шарів є значним у порівнянні

з загальним об'ємом деформованого матеріалу. У цьому відношенні можна говорити про необхідність урахування цього ефекту під час пояснення високої міцності «вусів» і тонких плівок крім існуючої точки зору про вплив на міцність їх структурної досконалості. Зміцнюючий ефект поверхні у пластичних кристалів обумовлений, в першу чергу, підвищенням опору зсуву атомних площин.

Велика кількість розглянутих експериментальних робіт є свідченням того, що під час деформації матеріалів з відмінним типом кристалічної решітки на поверхні утворюється більш міцний шар, ніж в об'ємі матеріалу [4].

Поверхневі атоми можуть мати відмінний тип зв'язку, наприклад, ковалентний. Зміна оточення атомів у поверхневому шарі викликає їх зміщення і зміну енергії взаємодії. Все це впливає на електронну структуру приповерхневих атомів, що проявляється у локалізації валентних електронів у металах. У результаті можлива зміна типу хімічного зв'язку.

З точки зору Архарова [5], через присутність у кристалічній решітці поверхні відповідних меж зерен і блоків, а також інших дефектів є можливість співіснування, навіть у чистому металі, областей, в яких міжатомна взаємодія розрізняється за ступенем локалізації електронів, тобто ступенем проявлення міжатомного зв'язку різного типу: металічного і ковалентного. І таке співіснування виявлено в приповерхневих шарах у випадку іонно-електронної емісії під дією іонного бомбардування, про що зазначено у [5].

Безпосередній аналіз дифракційних картин з поверхні кристалів під час проведених експериментів показав, наприклад у [6], що атоми у поверхневих шарах через відсутність сил міжатомного зв'язку з однієї сторони суттєво зміщені від своїх нормальних положень у кристалічній решітці. При цьому на поверхні кристала утворюються складні двовимірні структури з відмінною симетрією решітки, а також з іншою густиною, довжиною і типом зв'язку. Особливість будови і відмінність типу міжатомного зв'язку обумовлюють відмінність у міцнісних характеристиках поверхні і внутрішніх областей металів.

Проведені спеціальні дослідження деформації зразків, які складені з кількох зрощених різноорієнтованих монокристалів, показали, наприклад в [7], що граничні області, які розділяють окремі кристали, виявляють більш високий опір деформації, ніж самі кристали.

З іншої сторони, проведений літературний огляд свідчить, що поверхня є місцем, де переважно зароджуються тріщини, тому міцність залежить саме від стану тонкого поверхневого шару [8].

Так, наприклад, міцність кам'яної солі значно зростає і вона пластично деформується за відсутності поверхневих тріщин. Доказом цього є випробування солі у середовищах, які не просто розчиняють сіль, а розчиняють її разом з поверхневими тріщинами, створюючи бездефектну поверхню. Кам'яна сіль у гарячій воді робиться гнучкою, тоді як у гарячому маслі вона залишається крихкою. У киплячому насиченому розчині кам'яна сіль при цьому залишається крихкою, тоді як у холодній воді тонкі кристали досить пластичні, про що зазначено у [9].

Після хімічного полірування поверхні ниткоподібних кристалів  $\text{Al}_2\text{O}_3$  у ортофосфорній кислоті за температури  $210^\circ\text{C}$  спостерігалася десятикратне зростання міцності

«товстих» зразків. На «тонких» зразках значного ефекту полірування не було виявлено, про що вказано у [9]. Це є прямим проявом ефекту Іоффе на ниткоподібних кристалах, суть якого полягає у розчинності небезпечних поверхневих дефектів.

Небезпеку дефектів поверхні ниткоподібних кристалів можна зменшити за допомогою поверхневих покриттів. Так, покриття «товстих» ниткоподібних кристалів  $\text{Fe}$  шаром нікелю товщиною у 100 атомарних шарів різко підвищує їх міцність [9].

Враховуючи, що міцність «вусів» росте під час зменшення як їх товщини, так і довжини, Г. В. Бережкова у своїх, вказаних раніше мною публікаціях, говорить про статистичну природу міцності.

Таким чином, вплив поверхні на міцність кристалів слід розглядати у двох аспектах [10, 11]:

- зміцнюючому, що обумовлено специфічністю її будови і, відповідно, відмінністю властивостей щодо внутрішніх областей матеріалу;
- ослаблюючому, оскільки поверхня є місцем, де переважно зароджуються тріщини.

Очевидно, що у випадку саме ниткоподібних кристалів, структура яких характеризується високим ступенем бездефектності кристалічної решітки, вплив поверхні проявляється як зміцнюючий чинник. Але збільшення поперекового розміру кристалу знижує вплив поверхні у загальному вкладі приповерхневих і внутрішніх шарів матеріалу, які мають дуже низьку міцність. Ці висновки одержані під час дослідження стійкості двовимірних кристалів [11].

З метою обґрунтування припущення про те, що міцність «вусів» в основному обумовлена міцністю їх поверхні, шляхом розрахунку було визначено силу, за якої «вуса» різного діаметру починають пластично деформуватись. Силу визначали з діаграм деформації розтягом ниткоподібних кристалів міді про що вказано у [12].

Напруження межі текучості «вусів», одержаних для трьох різних їх діаметрів перераховували у силу, за якої починається текучість. Одержані дані свідчать, що вуса різної товщини починали текти за досягнення силою приблизно однакових значень. Але оскільки їх поперечне січення було різне, то напруження межі текучості було також різним [12]. Це саме можна сказати про міцність, оскільки вона визначається висотою зуба текучості.

Отже, відповідно до наведених даних у [10–12], можна вважати, що зниження напружень обумовлено зростанням поперечної площі, яка під час зростання не підвищує міцність «вусів». Основну силу опору деформації «вусів» створює саме їх поверхня.

Як було зазначено вище у [10–12], висока міцність тонких ниткоподібних кристалів обумовлена специфічною будовою поверхні і її значним вкладом у загальну міцність за малих об'ємів внутрішніх областей кристалів. Після досягнення межі пластичності напруження різко падає і починається течія матеріалу.

У процесі пластичної деформації ниткоподібні кристали зміцнюються, але досягнути попередньої міцності вже не можуть через виникнення на поверхні порогів і мікротріщин, які є концентраторами напружень. Але слід очікувати, що у деяких випадках, коли у процесі деформації ниткоподібних кристалів на поверхні не виникатимуть дефекти, деякі кристали можуть досягати високих показників міцності.

Слід окремо зазначити, що ці результати не вписуються у загальноприйняті погляди про високу міцність матеріалів як наслідок її досконалої бездефектної будови [12]. Під час деформації, наприклад, мідного «вуса» було досягнуте значне зміцнення, яке за величиною близьке до теоретичної міцності. Цей результат важко пояснити з точки зору ідеальної будови кристалічної решітки, оскільки висока міцність, яка досягає  $100\text{--}120\text{ кГ/мм}^2$  ( $10^9\text{--}10^{10}$  Па), у цьому випадку одержана у кристалі після значної пластичної деформації, у результаті якої кристалічна решітка металу є дефектною.

Про високу міцність, яка обумовлена дефектною структурою, а не ідеальною будовою кристалічної решітки повідомляють і інші дослідники. Бережкова і Рожанський, наприклад, в електронному мікроскопі спостерігали полісинтетичні двійники у базисних стрічкоподібних ниткоподібних кристалах  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

Під дією термічного удару ці стрічки розбивалися на дуже тонкі (товщиною  $200\text{--}500\text{ Å}$ ) двійникові пропарки, утворюючи систему полісинтетичних двійників. Під час їх механічних досліджень виявилось, що вони мають найбільш високу міцність, яка досягає для стрічок січенням  $0,1\text{--}1\text{ мк}$  до  $1500\text{ кГ/мм}^2$  ( $15000\text{ МПа}$ ). Міцність недеформованих стрічок того ж січення при цьому складала  $500\text{--}1000\text{ кГ/мм}^2$  ( $5000\text{--}10000\text{ МПа}$ ).

## 5. Висновки

Таким чином, проведений літературний огляд за проблемою дослідження в цілому дозволив виділити такі 2 суттєві моменти:

1. Специфічна структура і великий питомий об'єм приповерхневих шарів «вусів» у порівнянні з загальним об'ємом «вусів» обумовлює значний їх вплив на механічні властивості у порівнянні з монолітним матеріалом.
2. Міцність плівок і покриттів може змінюватись у широкому діапазоні і залежить від співвідношення об'єму приповерхневих шарів у порівнянні з загальним їх об'ємом та структурою поверхневих і внутрішніх шарів.

## Література

1. Козак, Л. Ю. Механічні властивості ниткоподібних кристалів [Текст] / Л. Ю. Козак // Фізика і хімія твердого тіла. — 1972. — Т. 2, № 4. — С. 691—697.
2. Бережкова, Г. В. Нитевидные кристаллы [Текст] / Г. В. Бережкова. — М.: Госиздат, 1969. — 158 с.
3. Беликов, А. М. Пластическая деформация нитевидных кристаллов [Текст] / А. М. Беликов. — Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. — 204 с.
4. Алехин, В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов [Текст] / В. П. Алехин. — М.: Наука, 1988. — 280 с.
5. Архаров, Б. И. О значении механизма формирования межатомных связей в сплавах для их прочностных и пластических свойств [Текст] / Б. И. Архаров, Ю. Г. Скрипка, Е. С. Мархасин // ФХММ. — 1978. — Т. 2. — С. 47—50.
6. Кан, Р. Физическое металоведение [Текст] / Р. Кан. — М.: Мир, 1970. — 283 с.
7. Лихтман, В. И. Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов [Текст] / В. И. Лихтман, П. А. Ребиндер, Г. В. Карпенко. — М.: Изд-во АН СССР, 1954. — 204 с.
8. Карпенко, Г. В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов [Текст] / Г. В. Карпенко. — К.: Наукова думка, 1976. — 128 с.
9. Иоффе, А. Ф. Физика кристаллов [Текст] / А. Ф. Иоффе. — Ленинград, Госиздат, 1929. — 320 с.
10. Козак, Л. Ю. Дослідження стійкості двовірної ґратки [Текст] / Л. Ю. Козак // Фізика і хімія твердого тіла. — 2000. — Т. 2, № 2. — С. 287—289.
11. Козак, Л. Ю. Комп'ютерне моделювання зсуву атомної площини у двовірній ґратці [Текст] / Л. Ю. Козак // ФХММ. — 1999. — Т. 1. — С. 114—115.
12. Бокштейн, С. З. Особенности упрочнения металлических и неметаллических нитевидных окнокристалов [Текст] / С. З. Бокштейн. — К.: Наукова думка, 1972. — 267 с.

## О МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

В статье в рамках продолжения литературного обзора по проблеме исследования рассмотрены некоторые механические свойства нитевидных кристаллов, на основании результатов ранее проведенных экспериментов показано влияние изменений характеристик данных свойств на структуру кристаллов и неоднозначность существующей оценки прямой взаимосвязи между структурой кристаллов и их прочностью.

**Ключевые слова:** нитевидные кристаллы, механические свойства, структура, прочность, взаимосвязь.

**Артем'єв Сергій Робленович**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра охорони праці та техногенно-екологічної безпеки, Національний університет цивільного захисту України, Україна, e-mail: [sergey.artemev.1967@mail.ru](mailto:sergey.artemev.1967@mail.ru).

**Андронов Володимир Анатолійович**, доктор технічних наук, професор, Національний університет цивільного захисту України, Україна.

**Семків Олег Михайлович**, кандидат технічних наук, Національний університет цивільного захисту України, Україна.

**Артемьев Сергей Робленович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра охраны труда и техногенно-экологической безопасности, Национальный университет гражданской защиты Украины, Украина.

**Андронов Владимир Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, Национальный университет гражданской защиты Украины, Украина.

**Семкив Олег Михайлович**, кандидат технических наук, Национальный университет гражданской защиты Украины, Украина.

**Artemev Sergey**, National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine, e-mail: [sergey.artemev.1967@mail.ru](mailto:sergey.artemev.1967@mail.ru).

**Andronov Vladimir**, National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine.

**Semkiv Oleg**, National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine.